低温离子渗硫技术在汽车轴齿部件表面改性中的应用及研究

常连霞 胡悦 张国政 张薇 巨萌 邵亮

（高端汽车集成与控制全国重点实验室，长春 130013）

摘要：采用X射线衍射仪（XRD）、能谱仪（EDS）、扫描电镜（SEM）、摩擦磨损试验机、疲劳试验和NVH测试对经不同表面处理的FAS3420钢试样进行了显微组织、减摩耐磨和噪声等性能的研究。结果显示，经低温离子渗硫和磁控溅射处理后的渗碳淬火钢表面形成以FeS为主的渗硫层，以高硬度的细针状马氏体为支撑，摩擦因数和体积磨损率明显降低，体现了减摩耐磨、抗咬合能力，可有效延长轴齿部件的疲劳寿命；通过硫化物固体润滑膜的表面保护和修复作用，降低了金属直接接触和齿轮磨损变形所引起的碰撞、冲击、振动等噪声，起到减摩降噪的效果。

关键词：低温离子渗流 表面改性 摩擦磨损 显微组织

中图分类号：U469.7 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250234

Application and Investigation of Low-temperature Ion Sulfurizing Technology in Surface Modification of Automobile Shaft and Gear Components

Chang Lianxia, Hu Yue, Zhang Guozheng, Zhang Wei, Ju Meng, Shao Liang

(National Key Laboratory of Advanced Vehicle Integration and Control, Changchun 130013)

Abstract: The Microstructure, friction and wear reduction and noise performance of FAS3420 steel samples with different surface treatments are investigated using XRD, EDS, SEM, friction and wear testing, fatigue testing, and NVH measurements. The results indicate that after low-temperature ion sulfurization and magnetron sputtering treatment, a sulfurizing layer primarily composed of FeS formed on the surface of the carburized and quenched steel. Supported by a high-hardness fine-needle martensite structure, the friction coefficient and volumetric wear rate are significantly reduced, demonstrating improved friction reduction, wear resistance, and anti-seizure capabilities, which can effectively extend the fatigue life of shaft and gear components. Through the surface protection and repair effects of sulfide solid lubricating films, direct metal contact and collisions, impacts, vibrations, and other noises caused by gear wear and deformation are reduced, thereby achieving friction reduction and noise suppression.

Key words: Low-temperature ion sulfurizing, Surface modification, Friction and wear, Microstructure

1 前言

据统计，全世界约1/3~1/2的能源以各种形式消耗在摩擦上，约80%的损坏零部件由各种形式的摩擦磨损引起[1-3]。随着高端装备的快速发展，轴齿类等关键传动部件处于更加恶劣的环境和极端工况中，因此对材料性能及结构设计的要求更加苛刻。提升新能源汽车传动系统效率是减少运行能耗和延长续驶里程的有效途径之一，而新能源汽车相对于燃油汽车对整车的噪声、振动和声

作者简介：常连霞（1978—），女，正高级工程师，博士学位，研究方向为汽车用金属材料、金属基复合材料及材料表面改性技术。

参考文献引用格式：

常连霞，胡悦，张国政，等. 低温离子渗硫技术在汽车轴齿部件表面改性中的应用及研究[J]. 汽车工艺与材料，2026(4)：8-16.

CHANG L X, HU Y, ZHANG G Z, et al. Application and Investigation of Low-temperature Ion Sulfurizing Technology in Surface Modification of Automobile Shaft and Gear Components[J]. Automobile Technology & Material, 2026(4): 8-16.

振粗糙度(Noise Vibration Horshness, NVH)要求更加严格,对传动系统的NVH性能更加敏感。高精度齿轮对提高新能源汽车的动力性、延长续驶里程、优化电驱动系统总成性能、整车轻量化及改善驾乘体验等均具有重要作用。高精度齿轮加工技术复杂,对加工设备、加工精度和工件表面质量要求高,而齿轮表面处理和性能优化是降低齿面磨损改善NVH性能的有效途径[4-6]。

根据齿面磨损量计算公式,齿面磨损量与齿间摩擦因数和齿间接触应力有关,而齿面磨损量与齿间摩擦因数的四次方成正比,因此,齿间摩擦系数对齿面磨损量的影响较大。

可利用低温离子渗硫技术,根据齿轮在高转速下的受力状态以及失效模式,对渗层材料组分和结构进行设计。采用低温离子渗硫工艺,在材料表面形成软质硫化物层,通过控制温度和层厚,极小影响齿轮的表面硬度。在渗硫过程中,硫原子沿着晶界和缺陷向内扩散,与Fe原子作用生成以FeS为主的硫化物相,呈梯度分布。由于FeS具有密排六方晶格结构,可沿其(0001)基面滑移,硫化物疏松多孔,便于储油,可成为良好的固体润滑剂[7]。为防止硫化物摩擦过程转移,提高抗咬合能力,利用磁控溅射技术,最外层镀较薄的MoS_2膜。MoS_2晶体是六方层状晶体结构,各个晶面之间以较弱的范德华力连接,晶面之间易发生滑移,且耐高温抗氧化,是优异的固体润滑剂[8]且MoS_2膜多孔,储油能力强,能隔绝金属,避免金属摩擦副的直接接触而引起粘着,同时降低真实接触应力和表面粗糙度,大幅减少表面缺陷并抑制疲劳裂纹扩展。综上,本文重点研究在渗碳淬火钢的表面进行低温离子渗硫工艺的条件、组织形态分布特征和可靠性。

2　试验材料及工艺

2.1　试验制备及金相组织表征

如图1所示为样件表面改性结构示意,过程分为预处理和雾化渗硫。首先将真空室抽真空至低压,通入氮氢气(N-H)、氩气(Ar),电极间施加高压电,对零件表面进行离子溅射与轰击。低温离子渗硫所用基体为渗碳淬火钢FAS3420加工而成的样件,为避免齿轮钢在渗硫过程中被二次回火,不得改变零部件表面组织形态和硬度,控制渗硫温度为120~200 ℃。除电压、真空度外,温度和时间是渗硫层形成的关键工艺参数,试验参数如表1所示。样件渗硫完毕后,将样品置于磁控溅射沉积室,抽真空至7×10^{-3} Pa以下,缓慢通入Ar和N_2,工作压力为1~7 Pa,开启MoS_2靶,沉积MoS_2,沉积功率为90~320 W,沉积温度小于180 ℃,沉积时间1~3 h,使样品表面沉积为1~2 μm的MoS_2层。摩擦磨损样块与齿轮试样同炉进行改性处理。

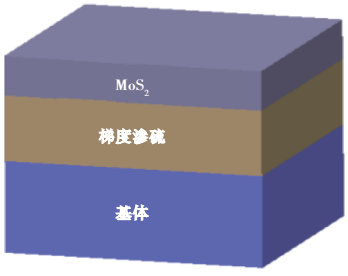


图1　表面改性结构示意

表1　低温离子渗硫技术参数

工艺温度/℃	真空度/Pa	电压/V	电流/A	保温时间/h	气体通入速率/L·min^{-1}
180	10	600	1~8	8	0.3
180	10	600	1~8	3	0.3
160	10	600	1~8	8	0.3
160	10	600	1~8	3	0.3

2.2　摩擦磨损及疲劳试验

对样件进行摩擦因数的测试、磨损率的计算以及磨损机理的分析和配副匹配性能的评价。摩擦磨损试验采用CSM摩擦磨损试验机、球块摩擦副,上试样为GCr15钢球,下试样为齿轮钢样块。上试样不进行表面改性处理,仅对下试样进行渗层处理,摩擦试验条件如表2所示。

表2　摩擦磨损试验条件

试验模式	试验单程/mm	试验载荷/N	试验温度	润滑油	试验速度/mm·s^{-1}	试验时间/min
往复直线运动	4	80	室温	32#机油 0.025 mL-微油	62.5	120

齿轮可靠性验证样品及安装如图2~图4所示。采用的样件为渐开线圆柱齿轮,法向模数为

4.5 mm，齿数分别为27、28，齿形角为20°，螺旋角为0°，齿顶高系数为1，顶隙系数为0.25，径向变位系数分别为0.153 4和0.134 6，齿宽为25 mm，齿轮副中心距125 mm，齿廓符合GB/T 1356—2001《通用机械和重型机械用圆柱齿轮 标准基本齿条齿廓》的要求，精度满足GB/T 10095《圆柱齿轮 ISO齿面公差分级制》规定的5级，该试验采用德国STRAMA MPS齿轮接触疲劳试验机，试验使用美孚SHC630齿轮油，封闭功率循环，通过扭矩液压系统耦合动态加载，试验过程中可对扭矩、转速、试验齿轮箱和伺服齿轮箱的油温等参数进行监控，转速测量误差±1.0%，扭矩测量误差±0.5%，温度测量误差±1 ℃。试验扭矩为850 N·m，齿轮润滑油循环油温为60 ℃，试验齿轮箱润滑油流量为9.0 L/min，转速为1 400 r/min。

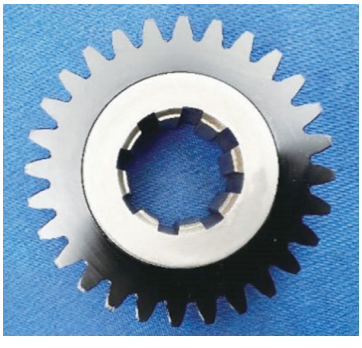


图2 未改性齿轮

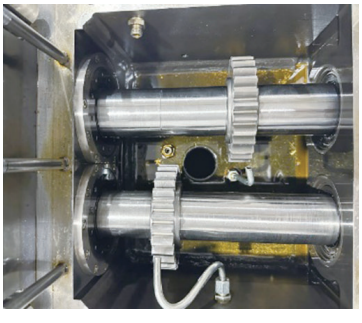


图3 齿轮装置



图4 渗硫齿轮

2.3 NVH试验

噪声检测设备采用LMS公司的SCM01试验机、B&K的4190传声器。磨合工况及试验技术参数分别如表3和表4所示。

表3 磨合工况技术条件

输入轴扭矩/N·m	输入轴转速/r·min^{-1}	磨合时间/min	试验油温/℃	加油量/L
160	4 000	30	80±5	1.62±0.1
−160	3 000	30	80±5	1.62±0.1

表4 试验工况技术条件

运行工况	输入转速/r·min^{-1}	输入扭矩/N·m	试验油温/℃	加油量/L
正驱匀加速持续20 s	10 000~12 000	96(30%负荷)	80±5	1.62±0.1

3 试验结果及分析

3.1 物相及金相组织特征分析

采用X射线衍射仪对低温离子渗硫表面进行慢扫，如图5所示，除明显的α-Fe相峰外，在2θ为30°、44°、52°位置存在明显的FeS峰，另外还存在一些微弱的FeS_2峰。利用能量色散谱(Energy Dispersive Spectroscopy，EDS)，对渗硫层样件表面、心部分别进行了EDS检测，结果如图6、图7所示，经低温离子渗硫处理的样件表层存在明显的以Fe、S、O、C为主的元素含量，还有少量其他基体合金元素，样件心部基体未检查到明显的硫元素。试验数据表明，样件表面已经形成以FeS为主的相，渗层存在一定厚度，心部并不存在明显的硫化物相。

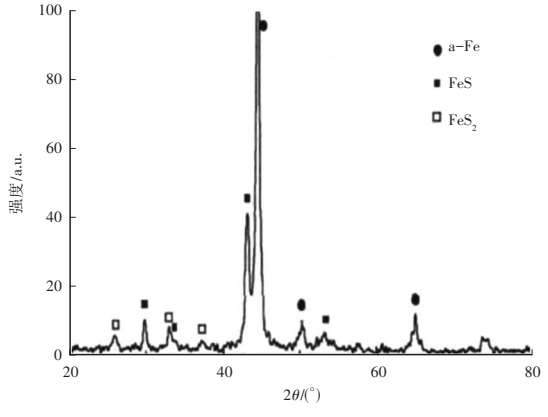


图5 低温离子渗硫XRD图谱

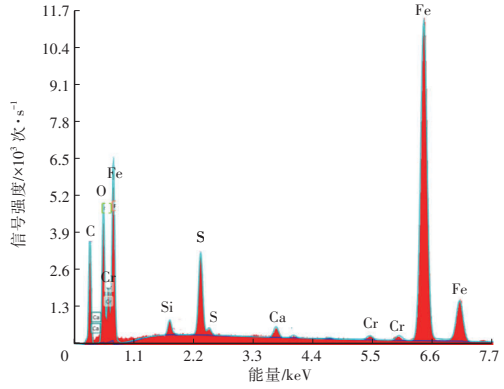


图6　渗硫样块EDS图谱

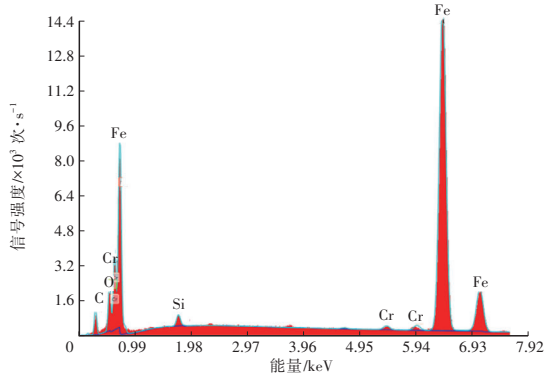
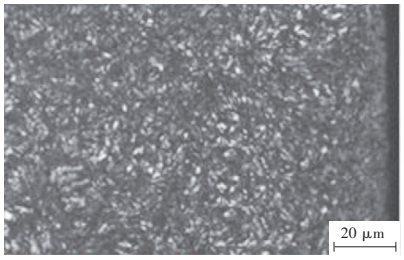
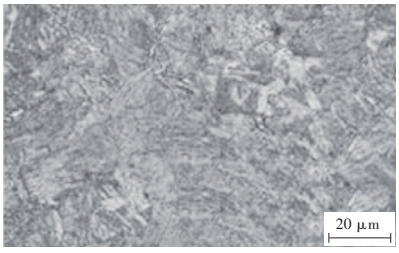


图7　基体样块EDS图谱

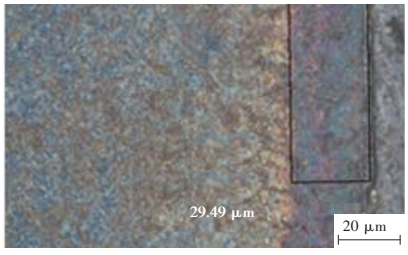
如图8a所示为渗碳淬火钢未经渗硫处理的样件金相组织,表面为高硬度的针状马氏体加残余奥氏体层。如图8b所示,心部为硬度较低的低碳马氏体,表面硬度控制在≥680 HV1,实测值为700~710 HV1,摩擦磨损较强的节圆和齿根部位的硬化层深度均为0.64 mm。均符合如表5所示的轴齿材料技术条件。如图8c~图8f所示,经低温离子渗硫后,为避免FeS与酸性物质发生化学反应,渗硫样件均以饱和苦味酸为腐蚀剂,可清晰显示渗硫层的组织形貌特征,表面呈现细小的颗粒状物质。这表明在低压低温离子渗硫炉内,在电场作用下,渗硫气氛释放活性S^{2-}离子,受电场驱动轰击样件表面,形成渗碳层+硫化合物层、渗碳层+化合物+扩散层、扩散层和基体材料的区域分布,使金相组织呈梯度分布,从而使样件也呈现出不同的力学特征。因工艺条件不同,尤其是关键条件温度和时长,渗硫层呈现不同的厚度,如表5所示,温度为180 ℃、保温时长为8 h的1#样件渗硫层厚度为29.49 μm,温度为160°、保温时长为3 h的4#样渗硫层厚度为11.89 μm。由此可见,通过调控温度和时长,可有效控制渗硫层的厚度,以匹配不同的工况需求。



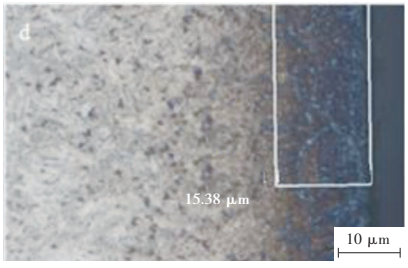
(a)未经渗硫样件的表面



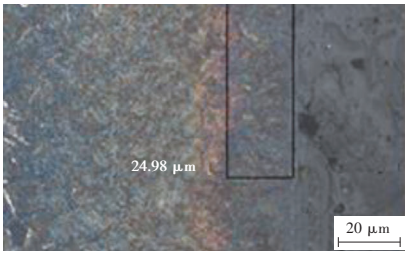
(b)未经渗硫样件的心部



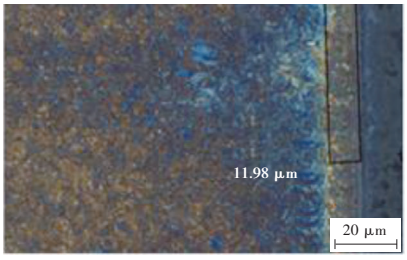
(c)渗硫后的1#件表面



(d)渗硫后的2#件表面



(e)渗硫后的3#件表面



(f)渗硫后的4#件表面

图8　渗硫前、后表面及心部金相组织

表5 性能参数及金相组织

检测项目	表面硬度/HV1	心部硬度/HV30	硬化层深度/mm	渗硫层厚度/μm	金相组织
渗碳淬火样	齿根:715、705、710 节圆:709、711、712	375、380、382	齿根:0.64 节圆:0.64		马氏体加残余奥氏体
渗硫件1#	694、701、690	360、362、369	0.58	29.49	马氏体加残余奥氏体加颗粒状化合物
渗硫件2#	706、708、701	365、368、366	0.64	15.38	
渗硫件3#	695、706、698	358、364、372	0.63	24.98	
渗硫件4#	711、702、715	370、368、375	0.62	11.89	

3.2 摩擦因数及磨损量分析

按照GB/T 12444—2006《金属材料 磨损试验方法 试环-试块滑动磨损试验》进行操作,采用CSM摩擦磨损试验机分别对渗碳淬火样件和经不同工艺渗硫处理+磁控溅射的厚度为1~2 μm MoS_2膜表面改性的4组样件进行摩擦因数和磨损量的对比试验,以评定不同工艺制备的样件所体现的摩擦磨损性能。如图9所示的2 h摩擦曲线数据显示,样件工况状态稳定。如表6所示的摩擦因数检测结果表明,4种渗硫工艺中:180 ℃、8 h工艺下1#样件的平均摩擦因数最小,为0.095;160 ℃、3 h工艺下4#样件的平均摩擦因数最大,为0.109;2#件与3#件平均摩擦因数较为接近;未经表面处理的渗碳钢样件的平均摩擦因数最大,为0.123。摩擦因数数据显示,经离子渗硫表面改性的齿轮钢样件较未经渗硫处理齿轮的平均摩擦因数降低11.4%~22.8%。以上数据分析可知,以渗碳淬火处理后的高硬度马氏体层为支撑,表面存在以FeS相为主的自润滑固体层,可有效降低摩擦因数,并且该摩擦因数受渗硫层厚度的影响,可结合工况需求进行合理设计。

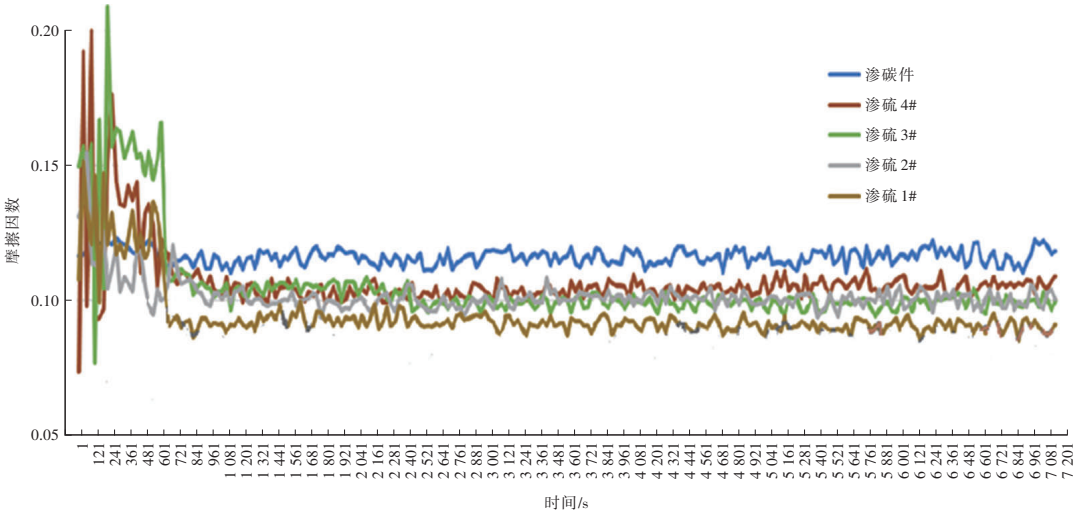


图9 摩擦因数曲线

表6 摩擦因数

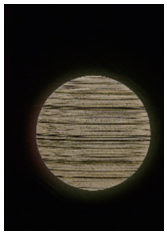
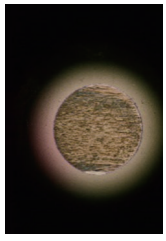
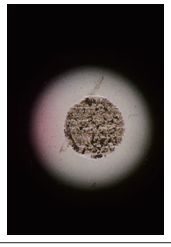
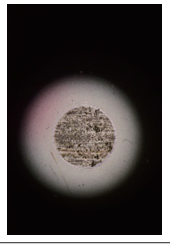
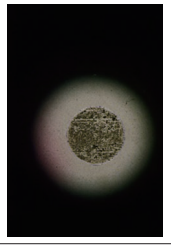
样品名称	第1次	第2次	第3次	平均值
渗碳件	0.119	0.124	0.126	0.123
渗硫件1#	0.098	0.094	0.092	0.095
渗硫件2#	0.102	0.096	0.093	0.097
渗硫件3#	0.101	0.102	0.105	0.103
渗硫件4#	0.107	0.109	0.112	0.109

如表7所示,对GCr15上试样钢球进行检测,其磨斑均呈圆形,接触稳定;与未经渗硫处理的渗碳淬火样块对磨,GCr15钢球磨斑呈现较深的划痕,磨斑直径为1.26 mm。经渗硫工艺处理的试样,磨斑直径较小、划痕较浅,其中1#件的磨斑直径为0.66 mm,表面改性后试样体现出良好的摩擦耐久性。

如图10所示为不同渗硫工艺处理+磁控溅射

MoS_2膜下试样磨损体积对比,图11~图12所示为试样表面三维磨损形貌。由数据可见,渗碳钢样件表面磨损最为严重,磨损体积最大,磨损形貌显示较大深度划痕,磨损体积约为渗硫工艺处理样件体积的3倍。这是因为渗碳钢表层为高硬度的马氏体组织层,与高硬度的GCr15对磨,摩擦因数较大,造成了较深的沟槽式划痕。渗硫样件磨损体积波动较小,部分最深划痕大于渗碳钢样件,但占比较小,这是由于渗硫层中的FeS相对较软,在摩擦力的作用下产生滑移,在金属表面形成有效的固体润滑膜,修复了样件摩擦初期的表面粗糙划痕,从而减小了样件对磨时的摩擦因数,磨损量较小。

表7　上试样磨斑及形貌

样件	渗碳钢	渗硫4#	渗硫3#	渗硫2#	渗硫1#
磨斑直径/mm	1.26	0.83	0.72	0.70	0.66
磨斑形貌（×100）					

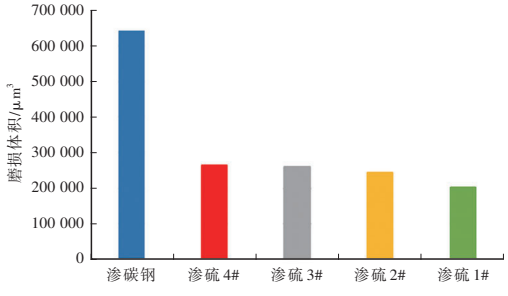


图10　下试样磨损体积

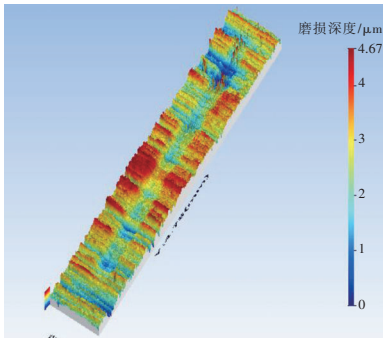
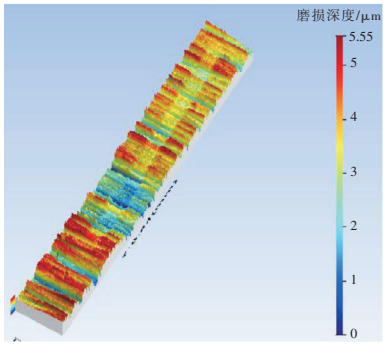
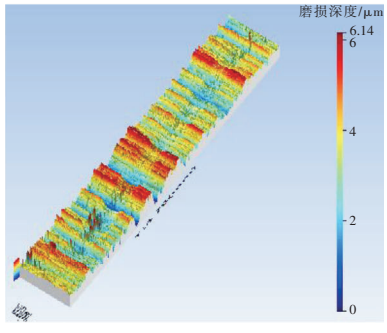


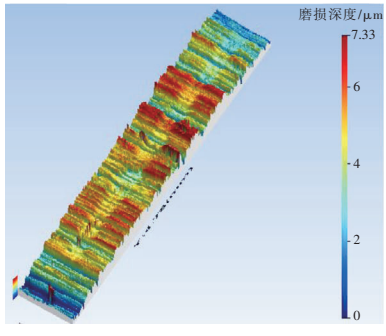
图11　渗碳钢试样三维形貌



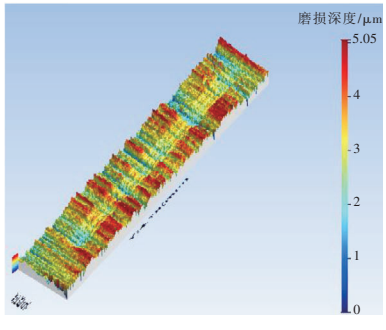
(a)1#渗硫样件



(b)2#渗硫样件



(c)3#渗硫样件



(d)4#渗硫样件

图12　不同工艺处理下试样表面三维形貌

3.3 疲劳试验及失效分析

为评价应用的可靠性，对渗碳淬火齿轮和经渗硫表面处理齿轮标准加工各 10 对，进行疲劳试验对比。依据 GB/T 14229—2021《齿轮接触疲劳强度试验方法》进行台架试验操作。齿面应力循环基数 N_0 设为 1.0×10^7，以试验齿轮齿面点蚀损伤程度作为齿面接触疲劳失效的判据，单齿点蚀面积率 R_s 达到 4% 即判定对应的齿轮失效，或齿轮副点蚀面积率 R_T 达到 0.5% 即判定对应的齿轮副失效。当试验应力循环次数达到 N_0 而齿面点蚀未达到损伤极限时，试验停止，判定该试验点越出。

表 8 和图 13 所示分别为渗碳淬火齿轮和经低温离子渗硫+磁控溅射处理的齿轮疲劳循环次数。为增大接触应力，试验采用了半齿加载。数据显示，在相同工况下，10 对齿轮中，未经表面改性的渗碳淬火齿轮循环次数均未达到循环基数 N_0 而失效。经低温离子渗硫+磁控溅射表面改性后的齿轮中，有 8 对达到循环基数 N_0，通过可靠性验证，失效件的循环次数也明显高于渗碳钢齿轮的循环次数，显示出较长的疲劳寿命。

表 8 齿轮疲劳试验数据

样品编号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
渗碳	次数	4 172 836	2 937 284	3 841 920	4 371 829	5 128 394	3 582 930	5 689 236	4 483 927	5 829 362	4 618 934
	结果	失效	失效	失效	失效	失效	失效	失效	失效	失效	失效
渗硫	次数	10 000 000	10 000 000	10 000 000	9 062 831	10 000 000	10 000 000	10 000 000	10 000 000	9 424 729	10 000 000
	结果	通过	通过	通过	失效	通过	通过	通过	通过	失效	通过

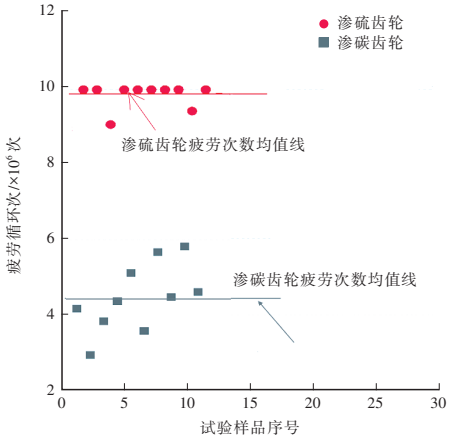
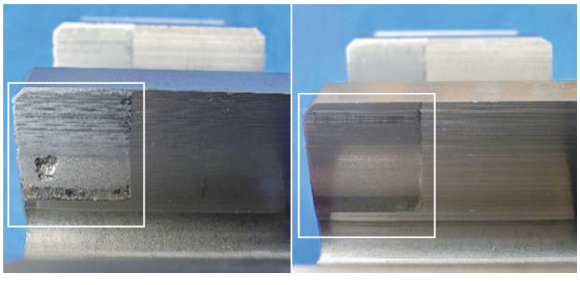


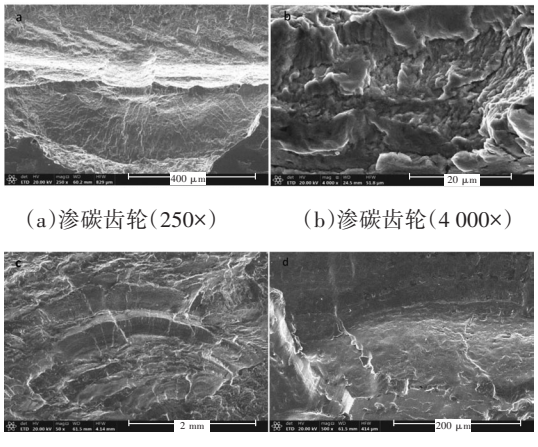
图 13 样件疲劳试验次数

对所有样件进行齿面超声清洗后，进行齿面摩擦磨损形貌分析。图 14 所示为宏观形貌，失效部位大部分位于齿轮啮合时应力较大的节圆和齿根附近，损伤部位显示麻点状和颗粒状点蚀、凹坑和层状剥离等，局部伴有微裂纹。渗碳齿轮磨损部位显示明显的凹坑、较大颗粒状点蚀聚集区域，通过测试的渗硫齿轮齿面，存在细小的麻点状点蚀坑，摩擦痕迹较浅。如图 15 所示扫描电镜微观组织形貌显示，渗碳齿轮断口裂纹源处为较为平缓的准解理形貌，为剪切摩擦造成的撕裂，并伴有疲劳裂纹扩展形貌特征；渗硫齿轮点蚀坑断口处呈台阶状分布，伴有疲劳裂纹扩展特征。



(a)渗碳淬火件 (b)离子渗硫件

图 14 图齿轮磨损形貌



(a)渗碳齿轮(250×) (b)渗碳齿轮(4 000×)

(c)渗硫齿轮(50×) (d)渗硫齿轮(500×)

图 15 齿轮点蚀处扫描电镜形貌

分析认为，点蚀是齿轮接触疲劳的典型形貌。如图 15a、图 15b 所示，随着渗碳钢齿轮循环啮合对磨，表面为高硬的马氏体层，在应力集中区域一旦产生疲劳微裂纹，易产生脆硬性撕裂断口，裂纹沿

特定晶面扩展,形成准解理形貌,由于脆硬、边缘不易碾平,在交变应力的长期作用下,导致裂纹扩展,形成更大的凹坑。同时,点蚀形成的硬质颗粒在高应力应变作用下移动,易造成更多的点蚀区域和较大凹坑,或引起剥落。如图15c、图15d所示,经低温离子渗硫+磁控溅射MoS_2膜改性后的齿面,表面相对较软,在麻点形成的过程中,硫化物固体润滑膜易于修复破损点,减小摩擦磨损,因此大部分表面改性的齿轮摩擦磨损区表面较为光滑,或形成较小的麻点状点蚀。但在齿面接触应力长期周期性变化时,在超越材料接触疲劳极限后,部分点蚀区形成的初始裂纹随着交变载荷的作用,以一定角度逐步向表面扩展,形成台阶状形貌。点蚀会使齿面减少承载面积,引起冲击和噪声,严重时轮齿会折断。造成齿面点蚀的主要原因为接触应力超过材料疲劳极限,必须通过优化设计、提高材料性能、提高加工精度和改善使用工况等来避免。

3.4　NVH试验分析

图16、图17所示为NVH对比试验结果,数据显示:30%负荷加速工况一级齿轮副啮合阶次噪声均值,渗硫齿轮比渗碳齿轮噪声声压级低0.71 dB(A);30%负荷加速工况下的二级齿轮副啮合阶次噪声均值,渗硫齿轮比渗碳齿轮噪声声压级低5.00 dB(A)。这说明在高转速、大扭矩复杂工况状态下,经低温离子渗硫表面改性的渗碳齿轮钢可在硫化物固体润滑膜的保护作用下,减小齿轮钢之间的摩擦磨损,从而减少撞击、摩擦和振动等产生的噪声。

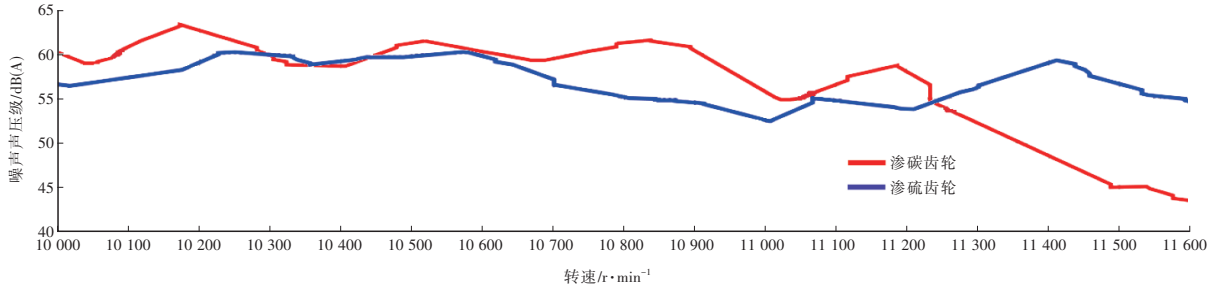


图16　正驱一级齿轮副啮合阶次噪声比较

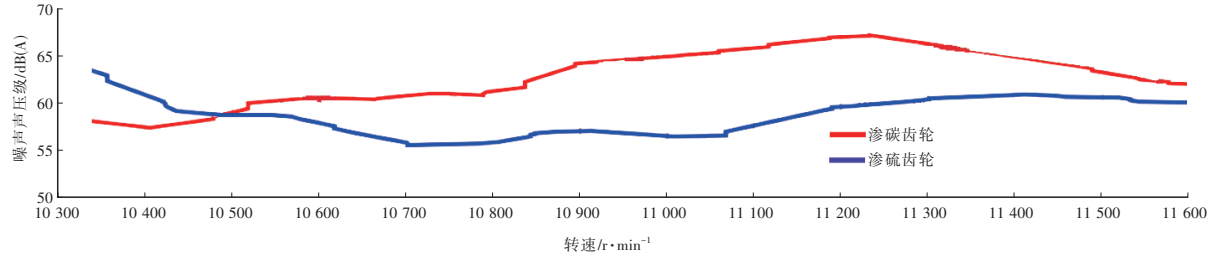


图17　正驱二级齿轮副啮合阶次噪声比较

4　结论

a.通过控制温度(<200 ℃)和保温时长,可对经渗碳淬火处理的FAS3420齿轮钢进行梯度渗硫,经低温离子渗硫工艺处理后,对渗碳淬火钢的表面硬度和硬化层深度影响极小。在该试验条件下,渗硫层厚度控制在10~30 μm,可根据实际工况需求进行设计。

b.摩擦磨损试验数据显示,经低温离子渗硫表面改性的齿轮钢样件平均摩擦因数比未经表面改性的齿轮钢样件降低11.4%~22.8%,渗碳钢磨损体积约达渗硫样件磨损体积的3倍。180 ℃、保温8 h和3 h的样件表现出良好的减摩、耐磨和抗咬合性能,能有效延长零部件的疲劳寿命。

c.疲劳试验和NVH试验显示,在较高转速和应力下,渗硫齿轮具备了良好可靠性。接触疲劳造成的点蚀失效形貌显示,渗碳齿轮划痕较深,损伤部位呈明显的凹坑、剥落和较大颗粒状点坑聚集区。通过测试的渗硫齿轮齿面,存在细小的麻点状点蚀坑,表面较为光滑,摩擦痕迹较浅;NVH数据表明,低温离子渗硫技术可起到降噪效果。硫化物固体润滑膜有效降低接触应力和表明粗糙度,大幅减少表面缺陷和疲劳裂纹扩展,达到减摩降噪的效果。

d. 基于以上试验数据和理论分析，低温离子渗硫技术+磁控溅射技术可有效地对齿轮钢进行表面改性，达到减摩耐磨、抗咬合和降噪的效果，具备应用潜力。

参考文献：

[1] HOLMBERG K, ERDEMIR A. Influence of Tribology on Global Energy Consumption, Costs and Emissions[J]. Friction, 2017, 5(3): 263-284.

[2] 杨显, 王静, 何川, 等. 材料表面渗硫技术的研究进展[J]. 机械工程, 2018(8): 15-18.

[3] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2021~2035)[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 172-180.

[4] 罗军, 郑健峰, 莫继良, 等. 钢表面多元共渗改性层的微动磨损行为研究[J]. 中国表面工程, 2009, 22(2): 15-19.

[5] 李德, 单琼飞, 王鑫, 等. GCr15轴承钢低温离子渗硫层的组织与耐磨性能[J]. 金属热处理, 2022, 47(12):181-187.

[6] 龙有红, 任岩平, 何添, 等. 31CrMoV9钢离子渗氮层的微动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2024, 44(5): 633-643.

[7] 祝国荣, 贾阳光, 邬晓颖, 等. 齿轮低温离子渗硫表面处理工艺技术研究[J]. 新技术新工艺, 2021, 8: 53-59.

[8] 张宇鹏, 王永东, 常萌阳, 等. MoS_2添加量对MoS_2/Ni60A固体自润滑涂层显微组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2022, 46(12): 24-35.

AT&M